



**Prioritätsbescheinigung über die Einreichung  
einer Patentanmeldung**

**Aktenzeichen:** 100 18 778.1

**Anmeldetag:** 15. April 2000

**Anmelder/Inhaber:** Carl Zeiss Jena GmbH,  
Jena/DE

**Bezeichnung:** Verfahren und Anordnung zur Selbst-  
kalibrierung eines diodengepumpten Fest-  
körperlasers, insbesondere eines durch-  
stimmbaren, diodengepumpten Festkörper-  
lasers

**IPC:** H 01 S 3/106

**Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ur-  
sprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.**

München, den 15. Februar 2001  
**Deutsches Patent- und Markenamt**  
**Der Präsident**  
Im Auftrag

Wetters

## **Verfahren und Anordnung zur Selbstkalibrierung eines diodengepumpten Festkörperlasers, insbesondere eines durchstimmbaren, diodengepumpten Festkörperlasers**

Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren und Anordnung zur Selbstkalibrierung eines diodengepumpten Festkörperlasers (DPSSL), insbesondere eines durchstimmbaren, diodengepumpten Festkörperlasers, bei dem zur Durchstimmung der Frequenz der Strahlung des Lasers die Resonatorlänge verändert wird.

So ist es aus der DE 42 42 862 bei einem von Laserdioden gepumpten Festkörperlaser bekannt, daß das laseraktive Medium mit einer piezoelektrischen Folie kontaktiert wird, welche ihrerseits mit einem Auskoppelspiegel kontaktiert ist. In seiner Länge wird der Luftspalt zwischen Lasermedium und dem Auskoppelspiegel abgestimmt. Durch eine geeignete Wahl der Reflektivitäten der Spiegel wird eine Modenselektion erreicht. Dieser Luftspalt weist eine solche geringe Länge auf, daß bei Anlegen einer elektrischen Spannung an die piezoelektrische Folie wahlweise eine Selektion einzelner Laserübergänge, ein Güteschalten oder eine Durchstimmung der Laserfrequenz ermöglicht wird.

In der DE 40 41 131 A1 und der DE 40 42 440 A1 ist ein Festkörperlaser mit longitudinalem Einmodenbetrieb beschrieben, dessen Laserkristall durch Laserdioden optisch gepumpt wird. Dem Verdopplerkristall ist eine mit einem Hochspannungsgenerator (HV-Generator) versehene Piezokeramik zur Abstimmung und Modulation der Wellenlänge sowohl der Grund- als auch der frequenzverdoppelten Strahlung. Durch eine variable Veränderung der Resonatorlänge über die gesamte Verstärkungsbandbreite des laseraktiven Materials erfolgt die Durchstimmung der Grundwellenlänge und auch der zweiten Harmonischen des Festkörperlasers. Unterschiedliche Resonatorlängen und eine Veränderung der longitudinalen Moden werden durch eine variable Positionierung des Auskoppelspiegels erreicht.

Der Laser und der verdoppelnde, nichtlineare Kristall sind räumlich voneinander getrennt angeordnet, wobei dem nichtlinearen Kristall eine mit einem HV-Generator ansteuerbare Piezokeramik zugeordnet ist.

Aus der DE 36 43 648 C2 ist es bekannt, bei durch Laserdioden gepumpten Festkörperlasern mit resonatorinterner Frequenzverdopplung im Resonatorraum ein Etalon in Form einer optischen Platte geringer Dicke zur Unterdrückung des Amplitudenrauschens im Resonatorraum vorzusehen, welches vorzugsweise am Ort einer Strahltaile angeordnet ist, um so auch die optischen Verluste zu minimieren.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren und eine Anordnung zur Kalibrierung bei einem durchstimbaren, diodengepumpten Festkörperlaser zu schaffen, welche es ermöglichen, Langzeitdrifts durch Selbstkalibrierung vor jedem Scan oder bei Bedarf auszugleichen und so bei erweiterbarem Durchstimbereich des Lasers stets die Ausgangsleistung des Lasers zu optimieren.

Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe mit einem Verfahren nach dem Oberbegriff des ersten Anspruchs mit den im kennzeichnenden Teil dieses Anspruchs offenbarten Mitteln gelöst.

Eine Anordnung zur Selbstkalibrierung des diodengepumpten Festkörperlasers, welcher eine Laserdiode als Pumplichtquelle, der eine Einkoppeloptik nachgeordnet ist, einen Laserkristall und, diesem nachgeordnet, einen Auskoppelspiegel oder einen nichtlinearen, frequenzverdoppelnden Kristall, wobei die Außenflächen des Laserkristalls und des Verdopplerkristalls oder des Auskoppelspiegels für die Lasergrundfrequenz und/oder für die frequenzverdoppelte Strahlung verspiegelt sind und den Resonator zwischen sich einschließen, und einen Aktuator zur Variation der Resonatorlänge zwecks Durchstimmung des Lasers umfaßt, ist vor allem dadurch gekennzeichnet, daß ein Etalon innerhalb des Resonators zur Veränderung des Durchstimbereiches und zur Bestimmung der Ausgangsleistung vorgesehen ist, wobei das Etalon um eine Drehachse dreh- oder schwenkbar ist, die zur optischen Achse des Lasers senkrecht oder unter einem kleinen Winkel dazu geneigt verläuft.

Um eine Vervielfachung der Frequenz der Strahlung des Lasers zu erzielen, können mehrere geeignete, nichtlineare Kristalle dem Laserkristall nachgeordnet werden.

In den weiteren abhängigen Ansprüchen sind nähere Einzelheiten und Ausgestaltungen der Erfindung offenbart.

So ist vorteilhaft, wenn zur Aufnahme einer Lernkurve das Etalon oder ein optisches Element mit größer werdender Amplitude durchgestimmt wird und die Korrektur der Abweichung von der optimalen Position am Rande des Durchstimmbereiches eines anderen optischen Elementes vorgenommen wird. So kann es auch günstig sein, wenn die Bewegung bzw. Einstellung des Etalons auf die Längenänderung des Resonators abgestimmt ist.

Ferner ist es vorteilhaft, wenn zur Optimierung eines optischen Elementes dieses selbst oder ein anderes optisches Element moduliert wird.

So wird durch Modulation des optischen Elementes eine Durchstimmkennlinie dieses oder eines anderen Elementes ermittelt und abgespeichert.

Weiterhin ist es von Vorteil, wenn mit Hilfe eines Microcontrollers oder Computers nach der aufgenommenen Laserkennlinie die frequenzselektiven Elemente des Lasers so zwischen zwei Modensprüngen eingestellt werden, daß Nebenmoden maximal unterdrückt werden.

Vorteilhaft ist es weiterhin, wenn die Lernkennlinie dadurch erstellt wird, daß die die Frequenz bestimmende Resonatorlänge als das "feinste" frequenzselektive Element des Lasers mit größer werdender Amplitude durchgestimmt wird, und die am Rande des Durchstimmbereiches auftretenden Modensprünge durch ein geeignetes Meßgerät oder über die Leistung des Lasers erfaßt (registriert) werden. Die Bewegung des nächst größeren frequenzselektiven Elementes am Rande des Durchstimmbereiches wird dann solange verändert (angepaßt), bis ein Frequenzsprung (in der Kennlinie) nicht mehr auftritt. Daraufhin wird dann die gesamte Stellung (Bewegung) des größeren Elementes abgespeichert.

Gemäß dem Verfahren wird ferner vorteilhaft die Leistungskurve des Lasers bei Veränderung des Drehwinkels  $\delta$  des Etalons und konstanter Resonatorlänge sowie bei Veränderung der Resonatorlänge und stillstehendem Etalon aufgenommen.

Bei der Anordnung zur Selbstkalibrierung des DPSSLs ist es vorteilhaft, wenn das Etalon als eine um die Drehachse dreh- oder schwenkbare, transparente Scheibe ausgebildet ist, welche durch einen Winkelantrieb winkelverstellbar ist.

Dabei kann als Antriebseinrichtung ein an sich bekannter Schrittmotor vorgesehen werden, von dessen Spulen mindestens eine durch eine Ansteuerschaltung ansteuerbar ist. Desgleichen kann jedoch als Antriebseinrichtung ein mit dem Etalon direkt oder unter Zwischenschaltung von weiteren Elementen in Wirkverbindung stehender Piezoaktuator vorgesehen sein, wobei es vorteilhaft ist, daß der Piezoaktuator als antreibendes Element ein Biegeelement umfaßt.

Ferner kann es von Vorteil sein, daß nur eine Spule des Schrittmotors angesteuert wird. Vorteilhaft kann es auch sein, wenn beide Spulen des Schrittmotors angesteuert werden, wobei der Feldvektor zur Vermeidung von Hysteresen moduliert wird. Der Motor kann vorteilhaft auch im Mikrostepbetrieb betrieben werden.

Als vorteilhaft hat es sich erwiesen, wenn die Drehachse des Etalon um einen Winkel  $\delta$  kleiner als  $10^\circ$  in Bezug auf die Senkrechte zur optischen Achse des Lasers geneigt angeordnet ist.

Die Kühlung des bewegten Elementes ist vorteilhaft und technisch einfach durch ein gut wärmeleitendes Element, vorzugsweise aus Kupfer oder einem anderen geeigneten Werkstoff, zu realisieren. Dabei ist es günstig, wenn ein Element dazu vorgesehen ist.

Zur Verhinderung der Ausbildung parasitärer Etalons sind vorteilhaft die im Resonator angeordneten Kristalle und weiteren optischen Elemente keilförmig ausgebildet.

Ferner kann ein Stehwellenresonator vorgesehen sein derart, daß ein sicherer "single frequency-Betrieb" durch eine geeignete Abstimmung der Selektivität des Etalons mit der durch die Anordnung und Auswahl der Dicke des Laserkristalls erreichten Unterdrückung der Nebenmoden durch das "spatial hole burning" erzielt wird.

Eine vorteilhafte Ausführung ergibt sich auch, wenn zur Durchstimmung des Lasers ein Piezoaktuator mit feststehendem Etalon vorgesehen ist, wobei der freie Spektralbereich des Etalons größer als die Verstärkungsbandbreite des Laserkristalls ist und die Finesse so gewählt ist, daß ein sicherer "single frequency-Betrieb" bei maximalem

Durchstimmbereich gewährleistet ist. Es kann auch vorteilhaft sein, daß das Etalon zur Erzielung eines größeren Durchstimmbereiches mitbewegt wird.

Die Erfindung soll anhand der Zeichnung näher erläutert werden. In der Zeichnung zeigen

Fig. 1 den schematischen Aufbau des Festkörperlaser mit motorgetriebenem Etalon in einer Ansicht von oben.

Fig. 2 den Festkörperlaser in einer Seitenansicht,

Fig. 3 einen Festkörperlaser mit Piezoaktuator zum Verkippen des Etalons,

Fig. 4 einen Festkörperlaser mit Piezoaktuator und Kupferring,

Fig. 5 einen Festkörperlaser mit keilförmigen Kristallen und optischen Elementen,

Fig. 6 eine Leistungskurve eines DPSSL und

Fig. 7 einen Frequenzkurve.

In den einzelnen Figuren werden gleiche Bezugszeichen für funktionsgleiche Teile und Baugruppen benutzt.

Der in Fig. 1 und 2 schematisch in mehreren Ansichten dargestellte DPSSL umfaßt einen Laserkristall 1 und als Pumplichtquelle eine Pumpdiode 2 oder eine entsprechende Anordnung mehrerer solcher Dioden. Die Pumpstrahlung, die von der Pumpdiode 2 ausgesendet wird, wird durch eine nachgeordnete Abbildungsoptik 3 auf den Laserkristall 1 fokussiert, um diesen zum Lasen anzuregen. Dem Laserkristall 1 sind in Richtung der optischen Achse 4 der Laseranordnung in der Reihenfolge ein winkelverstellbares Etalon 5, beispielsweise ein transparentes, scheibenförmiges Festkörperetalon, und ein nichtlinearer, die Frequenz der Strahlung des Laserkristalls 1 verdoppelnder Kristall 6, beispielsweise aus KTP, nachgeordnet. Dieses Etalon 5 dient der Veränderung, vor allem der Erweiterung, des Durchstimmbereiches und auch zur Einstellung und Bestimmung der Ausgangsleistung des Laserkristalls 1. Über ein Auskoppellement 7, hier als Beispiel ein Strahlenteilerelement, wird die frequenzverdoppelte Strahlung 8 ausgekoppelt. Ein Strahlungsanteil 9 (Fig. 2) der Strahlung 8 wird in an sich bekannter Weise durch das Auskoppellement 7 zu Meßzwecken ausgeblendet und einem Meßelement 10 zur Erzeugung von Meßsignalen zugeleitet.

Das Etalon 5 ist vorteilhaft auf einer Drehachse 11 fest angeordnet, welche mit einem Antrieb 12 in Wirkverbindung steht und durch diesen gedreht oder geschwenkt werden kann. In Fig. 1 ist als Antrieb 12 z. B. ein an sich bekannter Schrittmotor vorgesehen. Die Drehachse 11 verläuft senkrecht zur optischen Achse 4 der Laseranordnung, oder sie ist unter einem kleinen Winkel ( $\delta < 10^\circ$ ) zu dieser geneigt vorgesehen. Damit wird vermieden, daß beim Verdrehen des Etalons 5 in der Mittelstellung gekoppelte Resonatoren entstehen, die zu undefinierten Frequenzsprüngen führen können. Der Antrieb 12, beispielsweise die Spulen eines Schrittmotors, steht mit einer Ansteuereinrichtung 13 in Verbindung und wird von dieser entsprechend gesteuert. Durch diese Drehung des Etalons 5 kann der Durchstimmbereich des Lasers erweitert und seine Ausgangsleistung optimiert werden. Zur Messung dieser Ausgangsleistung ist beispielsweise das Meßelement 10 vorgesehen.

Vorteilhaft ist es, wenn das Etalon 5 unmittelbar auf der Achse (Drehachse 11) des Schrittmotors befestigt ist, womit eine einfache Konstruktion ohne zusätzliche Getriebe oder Zwischenglieder geschaffen wird und zusätzliche Hysteresen im Bewegungsablauf des Etalons 5 und andere mechanische Ansteuerprobleme vermieden werden.

Bei einem Schrittmotor als Antrieb 12 können nur eine oder auch beide Spulen durch die Ansteuereinrichtung 13 angesteuert werden. Beim Ansteuern nur einer Spule wird zum einen die Ansteuerung des Schrittmotors vereinfacht und zum anderen bleibt man innerhalb der einmal eingestellten Zahnung (Teilung) des Schrittmotors, was bedeutet, daß das Etalon 5 stets in einer nahezu richtigen Position ist und die Steuerung nicht "blind" ohne Regelsignal nach einer Startstellung suchen muß. Um die notwendige Winkelauflösung bei der Einstellung des Etalons 5 erzielen zu können, ist es erforderlich, bei der Ansteuerung des Schrittmotors durch die Ansteuereinrichtung 13 im Mikrostep-Betrieb zu arbeiten, d. h., das Verdrehen des Etalons 5 mit kleinen Schritten vorzunehmen oder die Spulen mit einem Analogsignal anzusteuern, das eine stufenlose Änderung des Etalonwinkels ermöglicht.

Werden beide Spulen des Schrittmotors durch entsprechende Modulation des Feldvektors angesteuert, ändert sich die Position des Etalons 5 nicht. Es können so "weiche" Hysteresen vermieden werden.

Im anderen Fall: Die Position des Etalons 5 wird moduliert. Dabei werden "weiche" und "harte" Hysteresen vermindert. Die Frequenz des Lasers wird dadurch nicht verändert.

"Weiche" Hysteresen sind beispielsweise durch Restmagnetisierungen bedingte Hysteresen, wenn ein Element nicht exakt einer Ansteuerspannung folgt, sondern "hinterherhinkt". "Harte" Hysteresen sind solche, die beispielsweise durch mechanisches Spiel zwischen zusammenwirkenden Teilen oder Elementen entstehen.

Einzelne Elemente der Laseranordnung besitzen hochreflektierende (HR) oder antireflektierende (AR) Beschichtungen. So besitzen die Elemente der Abbildungsoptik 3 AR-Schichten für die Pumpstrahlung. Die Fläche 1.1 des Laserkristalls 1 dagegen ist so beschichtet, daß sie für die Pumpstrahlung antireflektierend (AR) und für die Strahlung des Laserkristalls 1 (Grundwelle) hochreflektierend (HR) ist. Die Fläche 1.2 des Laserkristalls 1 ist AR für die Grundwelle des Laserkristalls 1, damit diese ungehindert dem frequenzverdoppelnden Kristall 6 zugeführt werden kann, jedoch HR für die Pumpstrahlung und auch für die frequenzverdoppelte Strahlung 8. Die Flächen 5.1 und 5.2 des Etalons 5 haben einen Reflexionsgrad zwischen 10 % und 40 % für die Strahlung des Laserkristalls 1 oder sind unbeschichtet. Die Fläche 6.1 des Verdopplerkristalls 6 ist HR für die frequenzverdoppelte Strahlung bei nicht keiligen Kristallen und AR für die Strahlung des Laserkristalls 1. Die Fläche 6.2 des Kristalls 6 ist HR für die Grundwelle und AR für die frequenzverdoppelte Strahlung des Verdopplerkristalls 6. Die beschichteten Flächen 1.1 und 6.2 grenzen den eigentlichen Laserresonator ein.

Der Verdopplerkristall 6 kann auch durch ein Auskoppellement ersetzt werden, wenn eine Frequenzverdopplung nicht erfolgen soll. In diesen Falle wird der Resonator durch die Fläche 1.1 des Laserkristalls 1 und eine Fläche des nunmehr anstelle des Verdopplerkristalls 6 eingesetzten Auskoppellementes (nicht dargestellt) bestimmt.

Die in Fig. 3 dargestellte Ausführung des DPSSL umfaßt zwischen dem Laserkristall 1 und dem Verdopplerkristall 6 ein Etalon 14 oder anderes frequenzselektives Element, welches auf einem ringförmigen Bauelement 15, z. B. einem Metallring, befestigt ist. Das Etalon 14 ist um eine senkrecht zur optischen Achse 4 des Lasers angeordnete Achse 16 schwenkbar. Zur Erzeugung der Schwenk- oder Kippbewegung des Etalons 14 ist ein Piezoaktuator 17 vorgesehen, welcher mit einer Ansteuereinrichtung 18 über die Anschlüsse 19 verbunden ist und von dieser angesteuert wird. Der Piezoaktuator 17 ist im Beispiel als ein Biegeelement ausgebildet. Es kann aber auch ein anderes gestaltetes Piezoelement, beispielsweise eines, welches seine Länge ändert, vorgesehen sein.



Wichtig ist nur, daß die Schwenkung des Etalons 14 in kleinen Winkelinkrementen realisierbar ist.

Die Fläche 1.1 des Laserkristalls 1 ist HR für das Laserlicht und AR für die Wellenlänge  $\lambda_p$  des Lichtes der Pumpdiode 2. Die Fläche 1.2 ist AR für die Wellenlänge  $\lambda_L$  des Lichtes des Laserkristalls 1. Die Fläche 6.1 des Verdopplerkristalls 6 ist AR für Licht der Wellenlänge  $\lambda_L$  während die Fläche 6.2 HR für die Wellenlänge  $\lambda_L$  und AR für Wellenlänge  $\lambda_D$  des frequenzverdoppelten Lichtes ist.

Der Resonator wird auch bei dieser Ausführungsform durch die Flächen 1.1 und 6.2 festgelegt. Zur Veränderung oder Einstellung der Länge dieses Resonators ist beispielsweise ein weiterer Piezoaktuator 20 vorgesehen, an welchem, wie in Fig. 3 vereinfacht dargestellt, der frequenzverdoppelnde Kristall 6 oder ein Auskoppelspiegel (nicht dargestellt) anliegt. Bei entsprechender Ansteuerung des Piezoaktuators 20 ist die Resonatorlänge gezielt veränder- und einstellbar. Auf diese Weise kann auch der Laser entsprechend durchgestimmt werden. Die Länge des Resonators liegt in der Größenordnung von einigen mm, kann aber auch kleiner als 5 mm sein.

Die in Fig. 4 dargestellte Ausführung des erfindungsgemäßen Lasers umfaßt neben den im Zusammenhang mit Fig. 1 genannten Bauteilen einen an der Fläche 6.1 des Verdopplerkristalls 6 anliegenden vorzugsweise dünnen Ring 21 aus einem gut wärmeleitenden Material, z. B. Kupfer, welcher der effektiven Wärmeableitung aus dem Verdopplerkristall 6 dient. Anstelle des Verdopplerkristalls 6 kann, wenn keine Frequenzverdopplung vorgesehen ist, ein Auskoppelspiegel angeordnet sein. Bei dieser Anordnung ist der Verdopplerkristall 6 ebenfalls mit dem einen Ende des Piezoaktuators 20 verbunden, dessen anderes Ende beispielsweise an einer Fassung 22 oder Aufnahme anliegt. Mit dem Piezoaktuator 20 kann auch hier die Position des Verdopplerkristalls 6 in Richtung der optischen Achse 4 variiert und eingestellt werden.

Fig. 5 zeigt eine Ausführung, bei welcher ein keilförmiger Laserkristall 23 vorgesehen ist. Des weiteren ist auch der Verdopplerkristall 24 keilförmig gestaltet. Keilförmige Kristalle dienen hier der Vermeidung parasitärer Etalons, welche zu einer Leistungsminderung des Lasers führen.

Bei dem Verfahren zur Selbstkalibrierung eines durchstimbaren, diodengepumpten Festkörperlasers, bei dem die Frequenz oder die Wellenlänge der Laserstrahlung der Grund- und/oder der verdoppelten Frequenz durch eine Veränderung der optischen Resonatorlänge mittels eines Piezoaktuators 17; 20 oder eines Brewsterfensters über die gesamte Verstärkungsbandbreite des laseraktiven Materials, des Laserkristalls 1, verändert wird, werden die Leistungskurven beim Durchstimmen eines Etalons 5; 14 oder von

entsprechenden optischen Elementen, die im Resonator angeordnet sind, aufgenommen und gespeichert. Aus diesen Leistungskurven wird mittels eines Microcontrollers oder Computers 25 eine Durchstimmfunktion für das jeweilige optische Element oder die optischen Elemente erzeugt bzw. abgeleitet, und mittels eines digitalen oder analogen Reglers wird mit Hilfe einer Lernkurve (Lernkennlinie) oder eines Regelsignals ein optimaler Arbeitspunkt für das oder die optischen Elemente zur maximalen Unterdrückung von Seitenmoden eingestellt.

Bei dem betrachteten single-frequency-Laser wird die Frequenz durch Änderung der Resonatorlänge z. B. mittels des Piezoaktuators 20 (Fig. 4) durchgestimmt.

So kann auch der Piezoaktor 20 zunächst mit kleiner, dann mit ansteigender Amplitude moduliert und die Leistung (oder die Effizienz) gemessen werden. Das Etalon 5 (Fig. 4) wird so eingestellt, daß die Leistung maximal wird (Offsetstellung) und bekommt ein Feedforward-Signal, dessen Ansteuerkurve nach jedem Durchgang gespeichert wird und dessen Form variiert wird.

Das Etalon 5; 14 kann z. B. mittels des Antriebes 12 oder des Piezoaktuators 17 um die zur optischen Achse 4 senkrecht oder nahezu senkrecht verlaufende Drehachse 11 gedreht werden, um den Durchstimbereich des Lasers zu erweitern und um seine Ausgangsleistung zu optimieren. Diese Ausgangsleistung kann durch das Meßelement oder eine Fotodiode gemessen werden. Hierbei tritt vor allem das Problem auf, daß die Bewegung des Etalons 5; 14 genau auf die Längenänderung des Resonators abgestimmt werden muß, was schwierig ist, da eine Wurzelfunktion zur Linearisierung des Frequenzganges des Etalons verwendet wird, sowie Hysteresen, Nichtlinearitäten und Langzeitdrifts der einzelnen verwendeten Bauelemente zu berücksichtigen sind.

Bei dem DPSSL wird die Leistungskurve des Lasers zum einen bei Veränderung des Drehwinkels  $\delta$  des Etalons 5; 14 bei konstanter Länge des Resonators und zum anderen bei Veränderung der Länge des Resonators und konstantem Drehwinkel  $\delta$ , also bei stillstehendem Etalon 5; 14 gemessen. Im letzteren Fall ändert sich die Frequenz kontinuierlich, und sie springt nach einem erreichten Leistungsminimum um einen Frequenzstufenbereich (FSB) des Resonators zurück. Der Drehwinkel  $\delta$  soll kleiner als  $10^\circ$  sein.

Das jeweilige Leistungsmaximum befindet sich etwa in der Mitte einer Frequenzstufe und die Transmissionsmaxima des verwendeten frequenzselektiven Bauelementes liegen genau übereinander. Durch Erzeugen und Abspeichern einer sog. Fitkurve kann auf den genauen Frequenzgang eines Bauelementes geschlossen werden, einschließlich aller Eigenschaften der Ansteuerkomponenten. Auf diese Weise ist es möglich, mit Hilfe einer Umkehrfunktion dieser Leistungskurven und einer geeigneten Ansteuerung, vorzugsweise eines Microcomputers oder PCs, alle frequenzselektiven Elemente genau synchron zu verstellen und damit den maximal möglichen Durchstimmbereich kontinuierlich zu durchfahren. Die Fitkurve kann jederzeit automatisch neu erzeugt werden, der Computer "lernt" also die Eigenschaften der Elemente.

Es hat sich auch als möglich erwiesen, als Kriterium nicht die Leistung, sondern die Effizienz zu verwenden. Bei dem DPSSL ist dieses das Verhältnis der eingestrahnten Pumpleistung, die näherungsweise proportional zu dem Strom der Pumpdiode 2 ansteigt, zur Ausgangsleistung des DPSSLs. Mittels eines Reglers wird die Ausgangsleistung auf einen konstanten Wert gehalten, und der Strom der Pumpdiode 2 hat in der Mitte einer Frequenzstufe ein Minimum und an den Stellen der Frequenzsprünge ein Maximum. Auf diese Weise werden geeignete Fitkurven erzeugt.

Bei Vorhandensein mehrerer frequenzselektiver Elemente im Resonator ist die Gesamttransmission aller dieser Elemente bekanntermaßen gegeben durch das Produkt aller Transmissionsfunktionen aller Elemente. Dazu zählen neben den einstellbaren Elementen, wie Resonatorlänge und Etalon auch die nichtverstimmbaren frequenzselektiven Dinge, wie nichtideale Beschichtung der Kristalle, parasitäre Etalons, Transmissionscharakteristiken der verwendeten Kristalle und lokale Beeinflussung der Elemente und Komponenten durch thermische Effekte. Für ein kontinuierliches Durchstimmen ist es erforderlich, daß die Selektivität der verstimmbaren Elemente im

Resonator die der restlichen Elemente übertrifft, wobei es dann möglich ist, daß der optimale Arbeitspunkt neben einem lokalen Leistungsminimum liegt.

Im Falle der in den Fig. 6 und 7 dargestellten Diagramme ist beispielsweise beim Durchstimmen des Resonators mit dem Piezoaktuator 20 ein kleiner Sprung zu erkennen, welcher aus einer ungünstigen Überlagerung anderer frequenzselektiver Elemente resultiert. Mit einem Microcomputer kann auch in diesem Falle mittels einer Lernkurve ein optimaler Arbeitspunkt für die einstellbaren Elemente des Lasers gefunden werden.

Bekanntermaßen kann es in einem Stehwellenresonator während des single frequency - Betriebes zur Ausbildung von longitudinalen Nebenmoden kommen, wenn die frequenzselektiven Elemente nicht optimal zueinander eingestellt sind und die Hauptmode dadurch Verluste erleidet, so daß ausreichend Restverstärkung für eine Nebenmode übrig geblieben ist, so daß diese anschwingen kann. Durch den Computer werden die Elemente so eingestellt, daß Nebenmoden wirkungsvoll und maximal unterdrückt werden. Dabei befindet sich jedes Element in der Mitte zwischen zwei Modensprüngen.

Gemäß einer Ausführung des Verfahrens ist es auch möglich, die Lernkennlinie dadurch zu erstellen, daß die die Frequenz bestimmende Resonatorlänge, als "feinstes" frequenzselektives Element des Lasers, langsam zuerst mit kleiner und dann größer werdender Amplitude durchgestimmt wird. An den Rändern des Durchstimmbereiches finden dann Modensprünge statt, die durch ein geeignetes Meßgerät oder über die Leistung des Lasers erfaßt und/oder registriert werden. Ein solches geeignetes Meßgerät kann z. B. ein auf den Laser stabilisiertes Fabry-Perot sein. Die Bewegung des nächst größeren frequenzselektiven Elementes, z. B. des Etalons, wird dann am Rande eines Durchstimmbereiches solange verändert bzw. angepaßt, bis ein Frequenzsprung in der Kennlinie nicht mehr auftritt. In Anschluß daran, wird dann die gesamte Stellung (Bewegung) des größeren frequenzselektiven Elementes abgespeichert.

Bei dem DPSSL handelt es sich vorteilhaft um einen Laser, dessen Resonator in der Größenordnung von etwa einigen Millimetern und darunter liegt.

Zur Durchstimmung des Lasers ist der Piezoaktuator mit feststehendem Etalon vorgesehen, wobei der Frequenzstufenbereich FSB des Etalons größer als die Verstärkungsbandbreite des Laserkristalls ist und die Finesse so gewählt ist, daß ein sicherer "single frequency-Betrieb" bei maximalem Durchstimmbereich gewährleistet ist.

Das Etalon kann auch zur Erzielung eines größeren Durchstimmbereiches mit bewegt werden.

Der Gegenstand der Anmeldung ist nicht nur auf diodengepumpte Festkörperlaser mit Frequenzverdopplung beschränkt, sondern er kann auch auf Festkörperlaser ausgedehnt werden, die Strahlung mit einem Vielfachen ( $n$ -fachen) der Grundfrequenz aussenden, wobei  $n$  größer als 2 ist. So kann beispielsweise mit einer Anordnung eine Vervielfachung der Frequenz erreicht werden, bei welcher mehrere geeignete, nicht lineare Kristalle dem Laserkristall nachgeordnet sind.

## Pat ntsprüche

1. Verfahren zur Selbstkalibrierung eines durchstimmbaren, diodengepumpten Festkörperlaser, bei dem die Frequenz oder die Wellenlänge der Laserstrahlung der Grund- und/oder der verdoppelten Frequenz durch eine Veränderung der optischen Resonatorlänge mittels eines Piezoaktuators oder eines Brewsterfensters über die gesamte Verstärkungsbandbreite des laseraktiven Materials verändert wird,  
dadurch gekennzeichnet,  
--- daß die Leistungskurven beim Durchstimmen eines Etalons oder von entsprechenden optischen Elementen, die im Resonator angeordnet sind, aufgenommen und gespeichert werden,  
--- daß mittels eines Microcontrollers oder Computers aus diesen Kurven eine Durchstimmfunktion für das jeweilige optische Element oder die optischen Elemente erzeugt (abgeleitet) wird.  
--- und daß mittels eines digitalen oder analogen Reglers mit Hilfe einer Lernkurve (Lernkennlinie) oder eines Regelsignals ein optimaler Arbeitspunkt für das oder die optischen Elemente zur maximalen Unterdrückung von Seitenmoden eingestellt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, *dadurch gekennzeichnet*,  
--- daß zur Aufnahme der Lernkurve das Etalon oder ein optisches Element mit größer werdender Amplitude durchgestimmt wird und die Korrektur der Abweichung von der optimalen Position am Rande des Durchstimbereiches eines anderen optischen Elementes vorgenommen wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1, *dadurch gekennzeichnet*,  
daß die Verstellung des Etalons auf die Längenänderung des Resonators abgestimmt wird.
4. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, *dadurch gekennzeichnet*,  
--- daß zur Optimierung eines optischen Elementes dieses selbst oder ein anderes optisches Element moduliert wird.
5. Verfahren nach einem der vorgehenden Ansprüche, *dadurch gekennzeichnet*,  
--- daß durch Modulation des optischen Elementes eine Durchstimmkennlinie dieses oder eines anderen Elementes erzeugt (aufgenommen) und abgespeichert wird.

6. Verfahren nach einem der vorgehenden Ansprüche, *dadurch gekennzeichnet*,  
 --- daß mit Hilfe des Microcontrollers oder Computers nach der aufgenommenen  
 Laserkennlinie die frequenzselektiven Elemente des Lasers so zwischen zwei  
 Modensprüngen eingestellt werden, daß Nebenmoden maximal unterdrückt werden.

7. Verfahren nach einem der vorgehenden Ansprüche, *dadurch gekennzeichnet*,  
 --- daß die Leistungskurve des Lasers bei Veränderung des Drehwinkels  $\delta$  des Etalons  
 und konstanter Resonatorlänge sowie bei Veränderung der Resonatorlänge und  
 stillstehendem Etalon aufgenommen wird.

8. Verfahren nach einem der vorgehenden Ansprüche, *dadurch gekennzeichnet*,  
 --- daß die Lernkennlinie dadurch erstellt wird, daß die die Frequenz bestimmende  
 Resonatorlänge (das "feinste" frequenzselektive Element des Lasers) mit größer  
 werdender Amplitude durchgestimmt wird,  
 --- daß die am Rande des Durchstimbereiches auftretenden Modensprünge durch ein  
 geeignetes Meßgerät oder über die Leistung des Lasers erfaßt und/oder registriert  
 werden,  
 --- daß dann die Bewegung des nächst größeren frequenzselektiven Elementes am  
 Rande des Durchstimbereiches solange verändert wird, bis ein Frequenzsprung (in der  
 Kennlinie) nicht mehr auftritt,  
 --- und daß dann die gesamte Stellung (Bewegung) des größeren Elementes  
 abgespeichert wird.

9. Anordnung zur Selbstkalibrierung eines durchstimbaren, diodengepumpten  
 Festkörperlasers, wobei der Laser  
 --- eine Laserdiode als Pumplichtquelle, der eine Einkoppeloptik nachgeordnet ist,  
 --- einen Laserkristall und, diesem nachgeordnet, ein Auskoppelspiegel oder ein  
 nichtlinearer frequenzverdoppelnder Kristall vorgesehen sind, wobei die Außenflächen  
 des Laserkristalls und des frequenzverdoppelnden Kristalls oder des Auskoppelspiegels  
 für die Lasergrundfrequenz und/oder für die frequenzverdoppelte Strahlung verspiegelt  
 sind und den Resonator zwischen sich einschließen,  
 --- und einen Aktuator zur Variation der Resonatorlänge zwecks Durchstimmung des  
 Lasers umfaßt,  
*dadurch gekennzeichnet*,

daß ein Etalon innerhalb des Resonators zur Veränderung (Erweiterung) des Durchstimmbereiches und zur Bestimmung der Ausgangsleistung des Lasers vorgesehen ist, wobei das Etalon um eine Drehachse dreh- oder schwenkbar ist, die zur optischen Achse des Lasers senkrecht oder unter einem kleinen Winkel geneigt verläuft.

10. Diodengepumpter Festkörperlaser nach Anspruch 9, *dadurch gekennzeichnet*, daß das Etalon als eine um die Drehachse dreh- oder schwenkbare, transparente Scheibe ausgebildet ist, welche durch einen Winkelantrieb winkelverstellbar ist.

11. Diodengepumpter Festkörperlaser nach Anspruch 10, *dadurch gekennzeichnet*, daß als Antriebseinrichtung ein an sich bekannter Schrittmotor vorgesehen ist, von dessen Spulen mindestens eine durch eine Ansteuerschaltung ansteuerbar ist.

12. Diodengepumpter Festkörperlaser nach mindestens einem der vorgehenden Ansprüche, *dadurch gekennzeichnet*, daß als Antriebsvorrichtung ein mit dem Etalon direkt oder unter Zwischenschaltung von weiteren Elementen in Wirkverbindung stehender Piezoaktuator vorgesehen ist.

13. Diodengepumpter Festkörperlaser nach mindestens einem der vorgehenden Ansprüche, *dadurch gekennzeichnet*, daß der Piezoaktuator ein Biegeelement als antreibendes Element umfaßt.

14. Diodengepumpter Festkörperlaser nach mindestens einem der vorgehenden Ansprüche, *dadurch gekennzeichnet*, daß nur eine Spule des Schrittmotors angesteuert wird.

15. Diodengepumpter Festkörperlaser nach mindestens einem der vorgehenden Ansprüche, *dadurch gekennzeichnet*, daß beide Spulen des Schrittmotors angesteuert werden, wobei der Feldvektor zur Vermeidung von Hysteresen moduliert wird.

16. Diodengepumpter Festkörperlaser nach mindestens einem der vorgehenden Ansprüche, *dadurch gekennzeichnet*, daß der Motor im Mikrostepbetrieb betrieben wird.



17. Diodengepumpter Festkörperlaser nach mindestens einem der vorgehenden Ansprüche, *dadurch gekennzeichnet*,  
daß die Drehachse des Etalon um einen Winkel  $\delta$  kleiner als  $10^\circ$  in Bezug auf die Senkrechte zur optischen Achse des Lasers geneigt ist.

18. Diodengepumpter Festkörperlaser nach mindestens einem der vorgehenden Ansprüche, *dadurch gekennzeichnet*,  
daß ein biegsames und gut wärmeleitendes Element, zur Kühlung des bewegten Elementes vorgesehen ist.

19. Diodengepumpter Festkörperlaser nach mindestens einem der vorgehenden Ansprüche, *dadurch gekennzeichnet*,  
daß das gut wärmeleitende Element aus Kupfer besteht.

20. Diodengepumpter Festkörperlaser nach mindestens einem der vorgehenden Ansprüche, *dadurch gekennzeichnet*,  
daß keilförmige Kristalle oder andere keilförmige optische Elemente zur Verhinderung der Ausbildung parasitärer Etalons vorgesehen sind.

21. Diodengepumpter Festkörperlaser nach mindestens einem der vorgehenden Ansprüche, *dadurch gekennzeichnet*,  
daß ein Stehwellenresonator vorgesehen ist derart, daß ein sicherer "single frequency-Betrieb" durch eine geeignete Abstimmung der Selektivität des Etalons mit der durch die Anordnung und Auswahl der Dicke und Dotierung des Laserkristalls erreichten Unterdrückung der Nebenmoden durch das "spatial hole burning" erzielt wird.

22. Diodengepumpter Festkörperlaser nach Anspruch 19, *dadurch gekennzeichnet*,  
daß die Resonatorlänge kleiner als 5 mm ist.

23. Diodengepumpter Festkörperlaser nach mindestens einem der vorgehenden Ansprüche, *dadurch gekennzeichnet*,  
daß zur Durchstimmung des Lasers ein Piezoaktuator mit feststehendem Etalon vorgesehen ist, wobei der Frequenzstufenbereich FSB des Etalons größer als die Verstärkungsbandbreite des Laserkristalls ist und die Finesse so gewählt ist, daß ein sicherer "single frequency-Betrieb" bei maximalem Durchstimmbereich gewährleistet ist.

24. Diodengepumpter Festkörperlaser nach Anspruch 21, *dadurch gekennzeichnet*, daß das Etalon zur Erzielung eines größeren Durchstimmbereiches mitbewegt wird.

25. Diodengepumpter Festkörperlaser nach mindestens einem der vorgehenden Ansprüche, *dadurch gekennzeichnet*, daß beide Spulen des Schrittmotors angesteuert werden, wobei die Position des Etalons moduliert wird.

## Zusammenfassung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Selbstkalibrierung eines durchstimmbaren, diodengepumpten Festkörperlaser, bei dem die Frequenz oder die Wellenlänge der Laserstrahlung der Grund- und/oder der verdoppelten Frequenz durch eine Veränderung der optischen Resonatorlänge mittels eines Piezoaktuators oder eines Brewsterfensters über die gesamte Verstärkungsbandbreite des laseraktiven Materials verändert wird.

Gemäß dem Verfahren werden die Leistungskurven beim Durchstimmen eines Etalons oder von entsprechenden optischen Elementen, die im Resonator angeordnet sind, aufgenommen und gespeichert und mittels eines Microcontrollers oder Computers wird aus diesen Kurven eine Durchstimmfunktion für das jeweilige optische Element oder die optischen Elemente erzeugt (abgeleitet).

Mittels eines digitalen oder analogen Reglers wird mit Hilfe einer Lernkurve (Lernkennlinie) oder eines Regelsignals ein optimaler Arbeitspunkt für das oder die optischen Elemente zur maximalen Unterdrückung von Seitenmoden eingestellt.

Bei dem Festkörperlaser ist ein Etalon innerhalb des Resonators zur Veränderung (Erweiterung) des Durchstimmbereiches und zur Bestimmung der Ausgangsleistung des Lasers vorgesehen, welches um eine Drehachse dreh- oder schwenkbar ist, die zur optischen Achse des Lasers senkrecht oder unter einem kleinen Winkel geneigt verläuft.

--Fig. 1 --

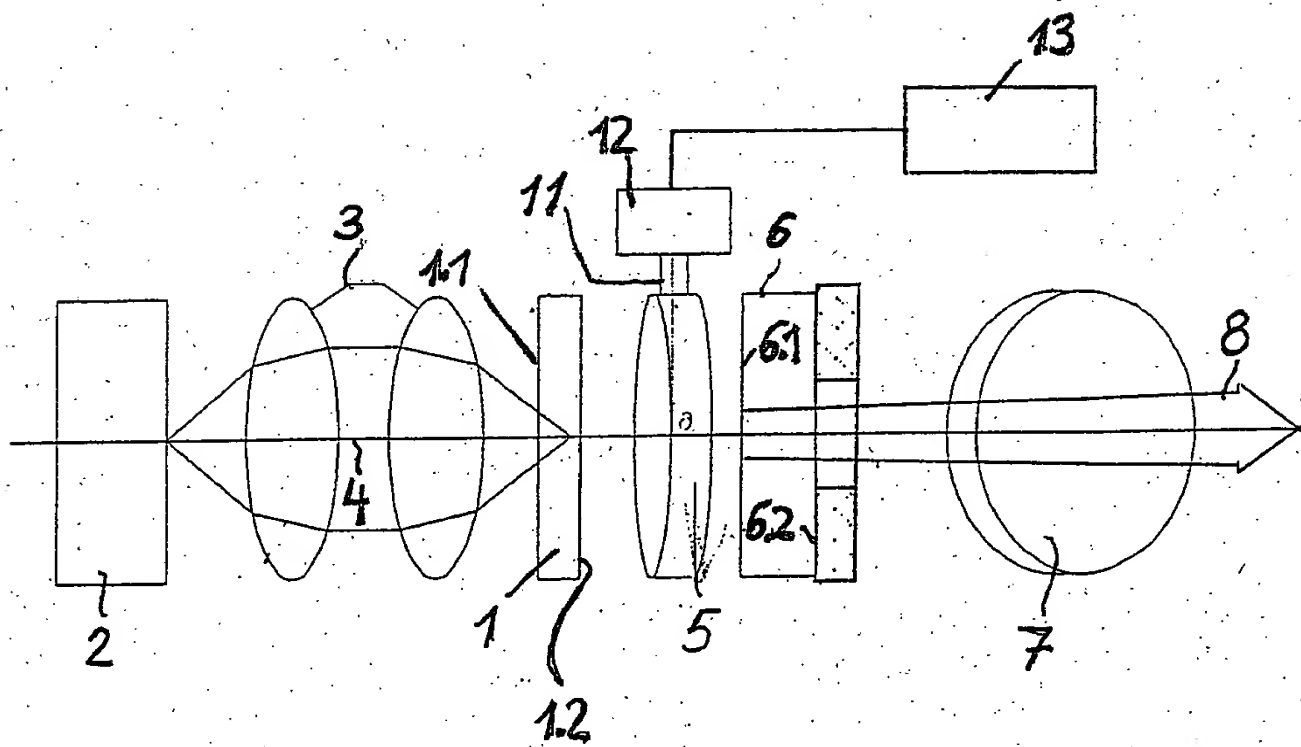


Fig. 1

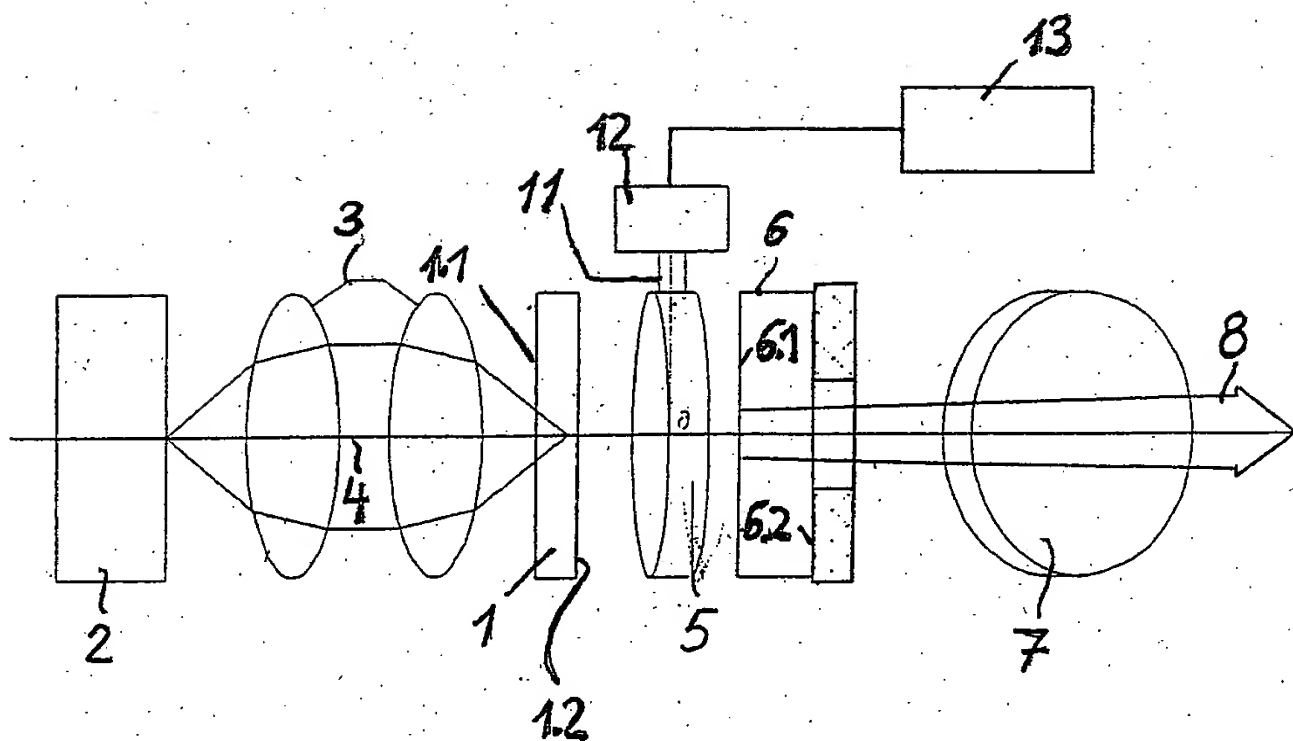


Fig. 1

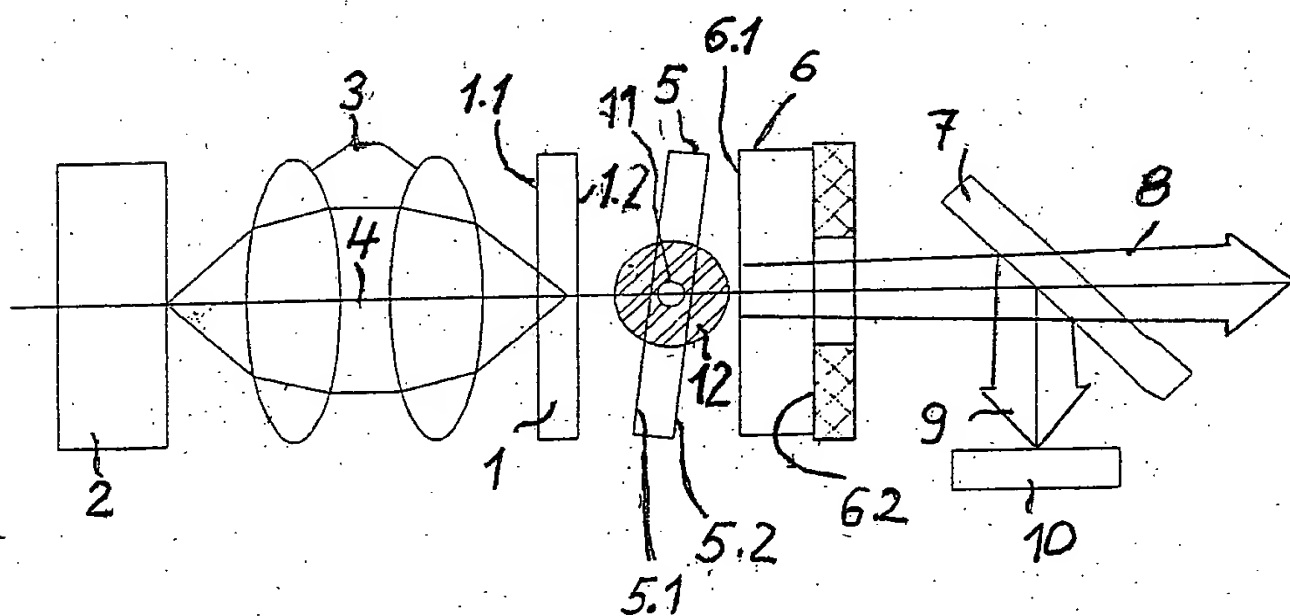


Fig. 2

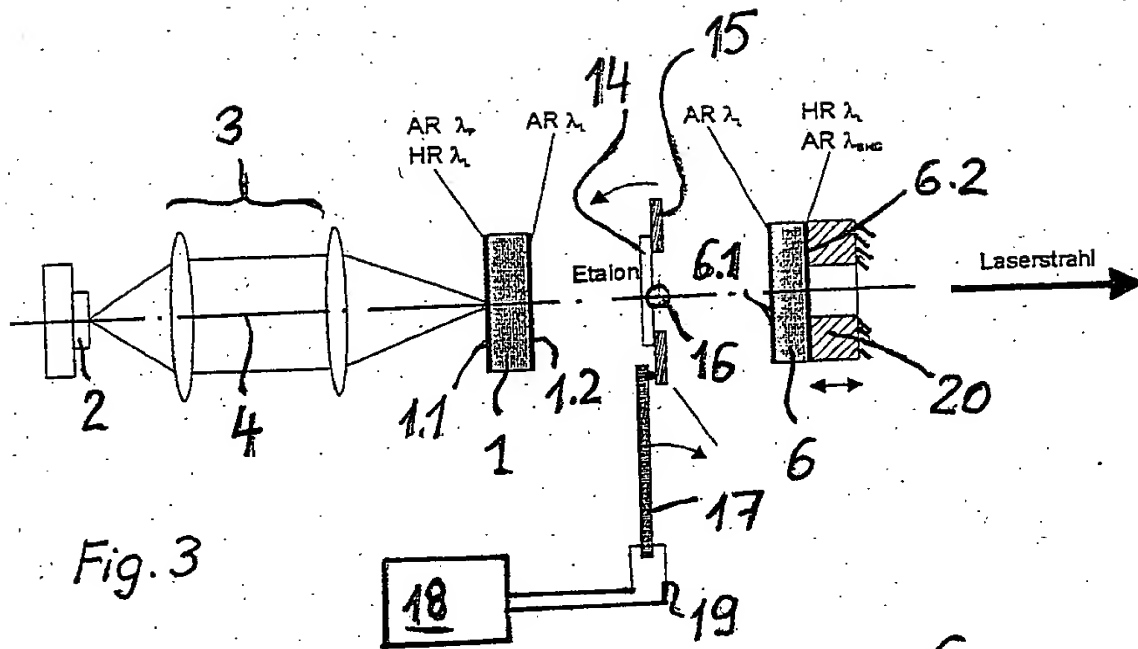


Fig. 3

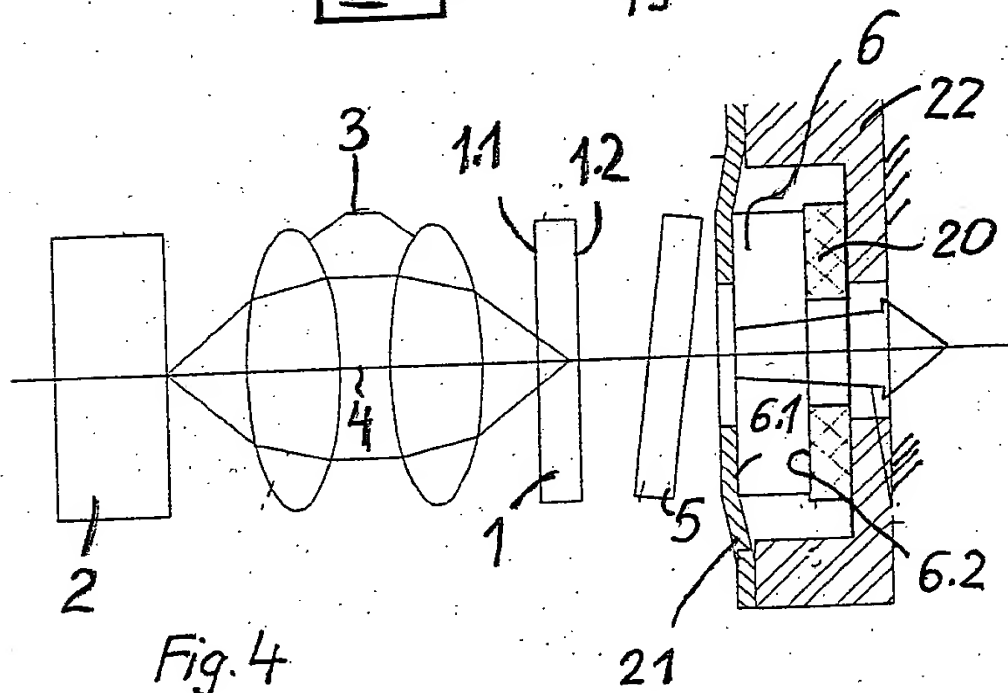


Fig. 4

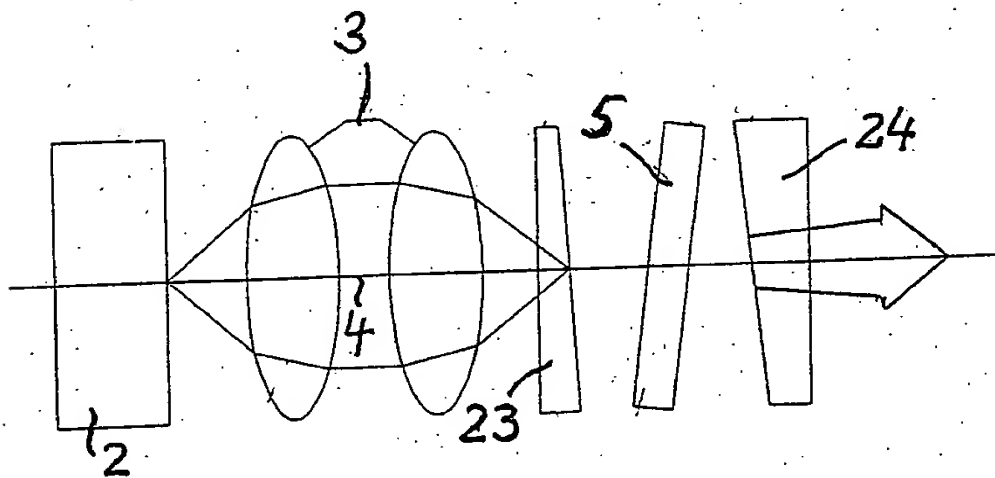


Fig. 5

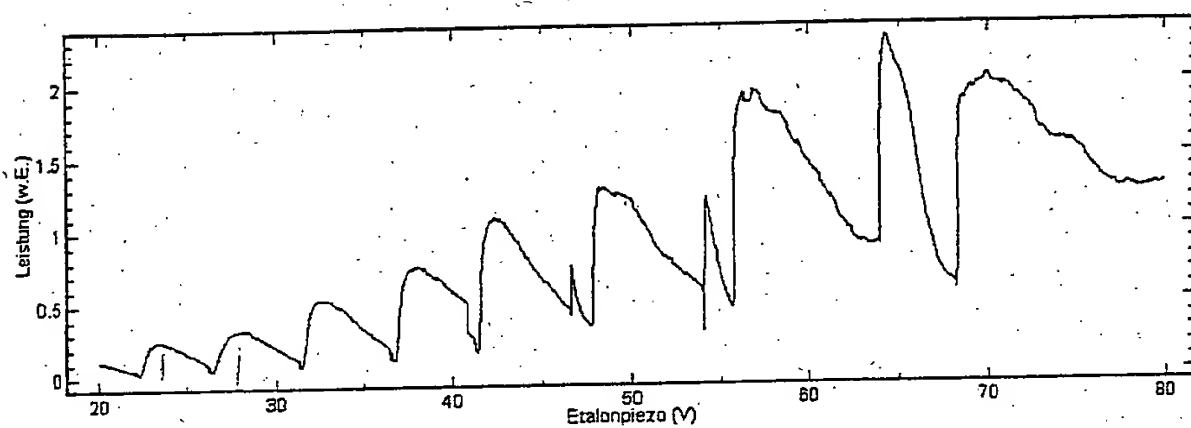


Fig. 6

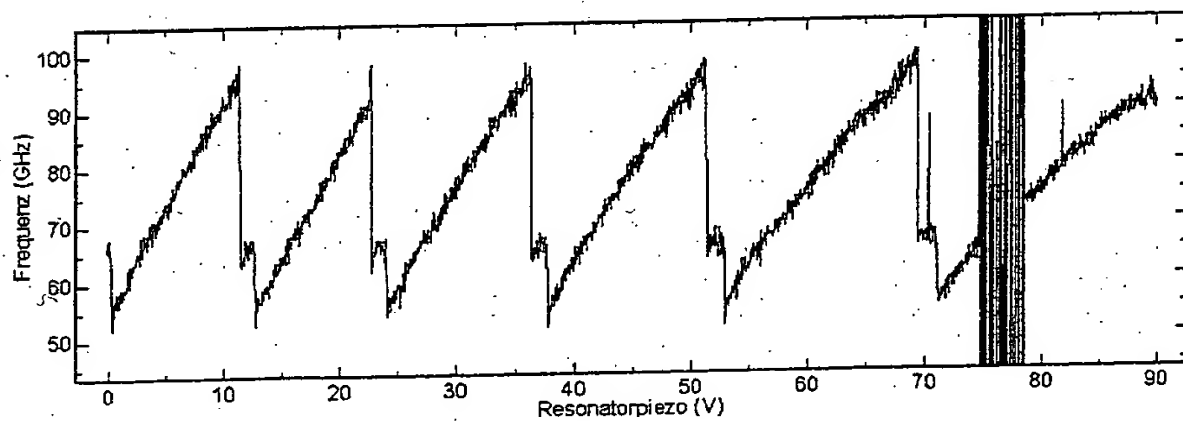


Fig. 7